

РАЗРАБОТКА МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ

А. И. Беликов, Н. М. Синявин, Г. В. Кипов

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты разработки базовых элементов конструкции магнетронной распылительной системы с трубчатой мишенью. Выполнены выбор компоновки и моделирование магнитной системы с использованием программного обеспечения «ELCUT». Разработана конструкция магнитной системы с охлаждением, выполнен анализ ее эффективности и проведен тепловой расчет. Определены параметры системы охлаждения при поглощаемой мощности катода в диапазоне 1000...3500 Вт/м².

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ, ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ МАГНЕТРОН

DESIGNING OF A MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM WITH A CYLINDRICAL TARGET

A. I. Belikov, N. M. Sinyavin, G. V. Kipov

ABSTRACT

The research presents the results of the development of basic design elements of magnetron sputtering system with a tubular target. Performed configuration selection and modeling of the magnetic system using the software “ELCUT”. The construction of the magnetic system with cooling is developed, analyzed its efficiency and carried out thermal calculation. Determined the parameters of the cooling system at the absorbed power of the cathode in the range of 1000...3500 W/m².

KEYWORDS

MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM, ION SPUTTERING, CYLINDRICAL MAGNETRON

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, которая решается в процессе разработки магнетронных распылительных систем (МРС) является обеспечение высокого коэффициента использования материала мишени (КИМ). Для МРС с цилиндрической мишенью КИМ может достигать значений порядка 80%.

Основным элементом, обеспечивающим локализацию области разряда и повышение степени ионизации рабочего газа, является магнитная система. При достаточных значениях магнитной индукции электроны удерживаются у поверхности катода, а их траектория движения изменяется так, что это приводит к увеличению количества столкновений с молекулами рабочего газа и повышению эффективности его ионизации. В результате бомбардировки мишени ионами рабочего газа осуществляется распыление материала, при этом нагревается мишень. Для поддержания допустимых рабочих температур магнитной системы необходимо наличие ее принудительного

охлаждения. При проектировании МРС требуется моделирование и оптимизация магнитной системы, а также решение задач эффективного теплоотвода.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В магнетронной распылительной системе величина магнитной индукции определяется [1] величиной подаваемого на катод напряжения (U) и расстоянием между анодом и катодом (d). Критическое значение магнитной индукции определяется исходя из зависимости:

$$\left(\frac{U}{B^2}\right)_{\text{кр}} = \frac{ed^2}{2m},$$

где B – индукция магнитного поля, U – подаваемое напряжение на катод, e – заряд электрона, m – масса электрона, d – расстояние между катодом и анодом.

График, построенный по этой формуле и представленный на рис.1, является параболой отсечки Хэлла и определяет критическое значение магнитной индукции.

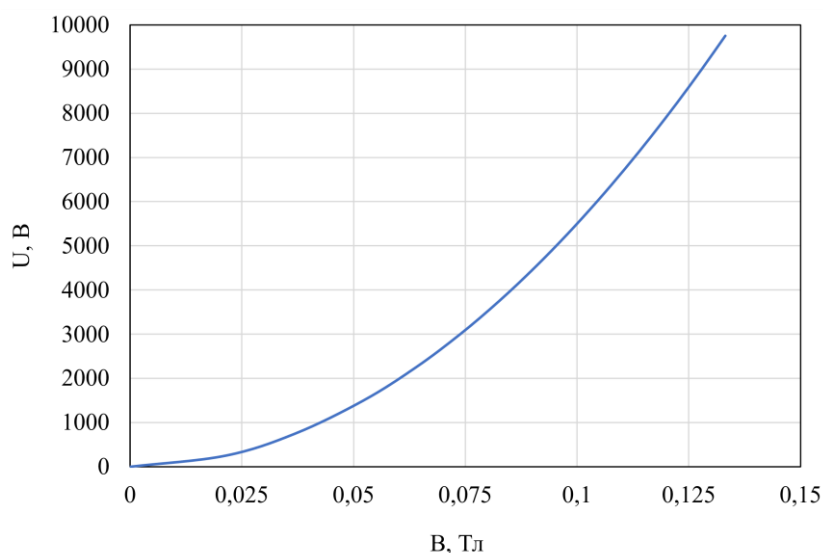


Рис. 1. Парабола отсечки Хэлла

Соответствующие соотношения значения индукции магнитного поля с критическими значениями определяют характер траекторий электрона в области между анодом и катодом. Так, при значении $B < B_{\text{кр}}$ траектория электрона уходит на анод, как показано на рис.2 (траектория 1), при этом эффективность ионизации снижается. Траектория 2 соответствует значению $B = B_{\text{кр}}$, а траектория 3 характерна для значений $B > B_{\text{кр}}$. Поэтому для эффективной ионизации значение магнитной индукции должно превышать критическое значение. Для большинства МРС значение магнитной индукции у поверхности мишени находится в диапазоне 0,03...0,1 Тл.

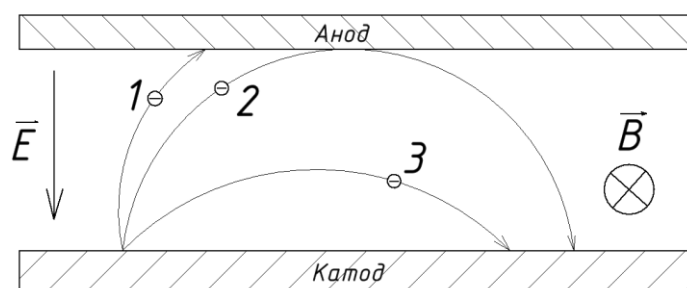
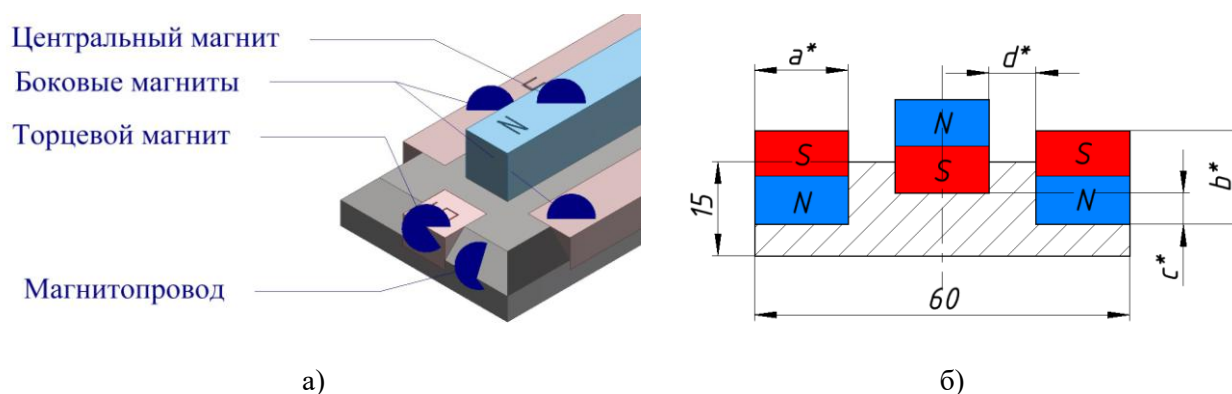


Рис. 2. Траектории движения электронов

Для реализации магнитной системы, которая может быть размещена внутри трубчатого катода была предложена следующая базовая схема расположения магнитов (рис.3а). Рассматриваемая компоновка моделировалась на предмет распределения магнитных полей с учетом влияния на них варьируемых геометрических параметров a , b , c и d расположения магнитов (рис.3б). В моделях были заложены неодимовые магниты марки N38M длиной 100 мм и поперечным сечением 15x15 мм. Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения «ELCUT», на основе методов, описанных в литературе [2].



a^* , b^* – ширина и высота магнитов, c^* – расстояние по вертикали между основаниями магнитов, d^* – зазор между магнитами по горизонтали

Рис. 3. Конструкция магнитной системы: компоновка (а) и геометрические размеры в сечении (б)

Моделировались следующие варианты компоновок:

компоновка №1 – размер c^* принимался равным 0 мм, размер магнитов произвольный;

компоновка №2 – высота магнитов b^* в 2 раза меньше ширины a^* , размер $c^* = 5$ мм;

компоновка №3 – магниты квадратного сечения $a^* = b^* = 15$ мм, размер $c^* = 5$ мм.

Внутренний диаметр катода мишени составлял 80 мм для вариантов компоновок №1 и №2 и 105 мм - для варианта №3. На рис. 4 представлена картина распределения магнитных полей в поперечном сечении компоновки №3.

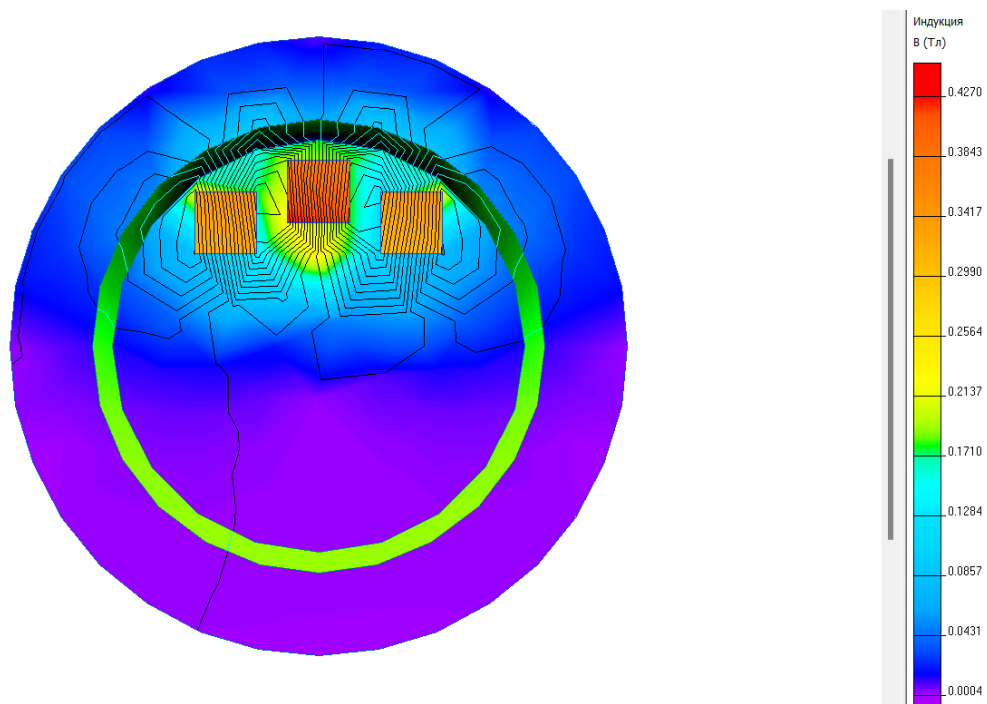


Рис. 4. Распределение абсолютного значения магнитной индукции для компоновки №3

На основе полученных результатов моделирования были получены графики (рис.5) распределения абсолютного значения магнитной индукции в зависимости от угла поворота от вертикальной оси симметрии в сечении и на расстоянии 1, 5 и 10 мм от поверхности катода.

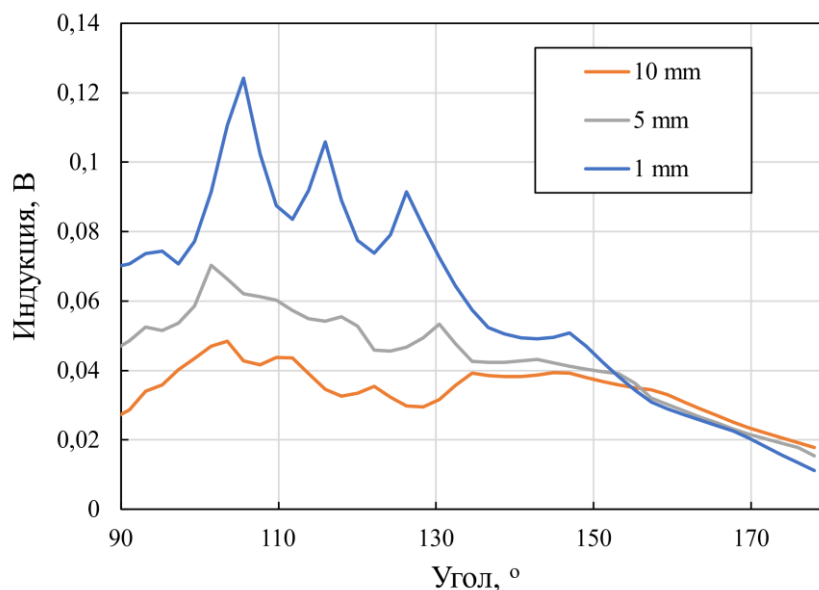
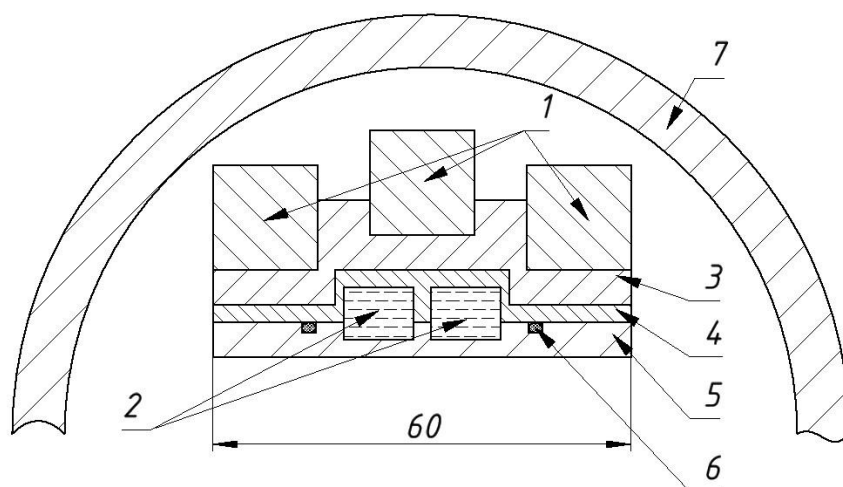


Рис. 5. Значения магнитной индукции на различных расстояниях от катода

Надежность и стабильность работы МРС в существенной степени определяются качеством системы охлаждения. В этой связи, в рамках проектирования МРС был выполнен тепловой расчет и моделирование температурных полей в программном обеспечении «SolidWorks» с использованием модуля «Термический анализ» [3]. Для этого

была создана полигональная модель, отвечающая геометрическим и физическим характеристикам разрабатываемой конструкции, эскиз которой представлен на рис. 6. Разработка конструкции велась по принципам, описанным в справочной литературе [4].



1 – магниты, 2 – каналы охлаждающей жидкости, 3 – магнетронпровод, 4 – крышка охлаждающей системы, 5 – основание охлаждающей системы, 6 – уплотнения, 7 – катод

Рис. 6. Элементы и конструкция магнитной и охлаждающей систем

В модели учитывалось наличие следующих составляющих теплообмена: теплопроводности, излучения и конвекции.

При настройке параметров теплообмена излучением в программном обеспечении использовались коэффициенты излучения (табл.1), подобранные на основании литературных данных [5].

Таблица 1. Коэффициенты излучения поверхностей элементов конструкции

Поверхности	Коэффициент излучения
Внутренняя поверхность катода	0,07
Внешняя поверхность катода	0,22
Крышка и основание охлаждающей системы	0,55
Магнетронпровод	0,75
Магниты	0,05

С использованием этих данных моделирование температурных полей проводилось для различных коэффициентов конвективной теплоотдачи и поглощаемой тепловой мощности. При этом варьирование одного параметра происходило при фиксированном значении другого.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

На основе полученных в ходе моделирования распределений магнитной индукции для вариантов компоновок магнитов было проведено их сравнение. Для эффективной

ионизации рабочего газа необходимы значения около 0,1 Тл у поверхности катода и более равномерное распределение магнитных полей в зоне эрозии. Таким критериям в наибольшей степени удовлетворяет третий вариант компоновки. Границы зоны эрозии мишени определяются точками пересечения кривой тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции с осью абсцисс на графике рис. 7. Зона эрозии при этом находится в угловом секторе радиальной координаты поперечного сечения катода в диапазоне $0^\circ \dots 30^\circ$ от оси симметрии магнитной системы.

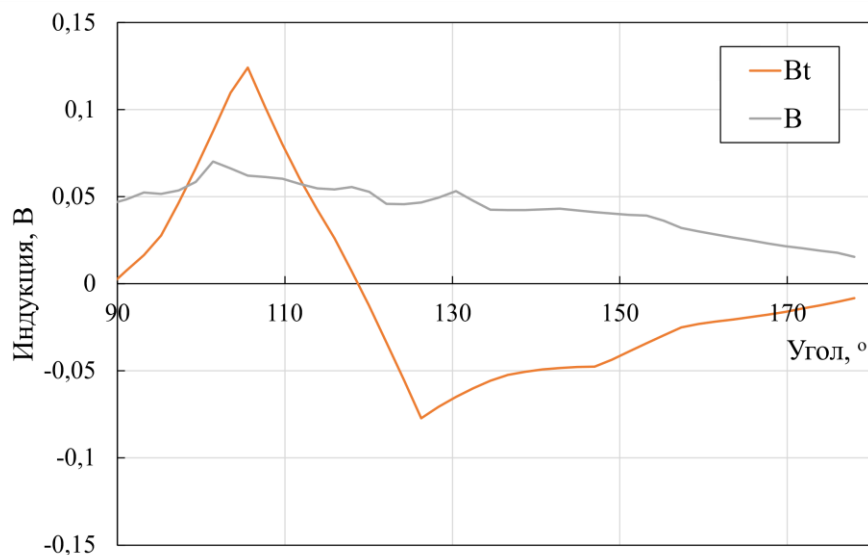


Рис. 7. График тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции

Результаты моделирования распределения температур в конструкции магнитной системы МРС для коэффициента теплоотдачи охлаждающей жидкости $\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и плотности мощности на катоде $W = 2000 \text{ Вт/м}^2$ приведены на рис. 8. Были определены области магнитной системы с максимальной температурой в ее конструкции. Поскольку для неодимовых магнитов марки N38M максимальная рабочая температура составляет 100°C , то необходимо обеспечивать охлаждение, чтобы не допустить их перегрева. Поэтому на основе моделирования были получены зависимости максимальной температуры магнитной системы от коэффициента конвективного теплообмена жидкости, (рис. 9а) и от поглощаемой катодом тепловой мощности (рис. 9б). Данные зависимости характеризуют режимы, в которых допустима работа МРС предложенной конструкции.

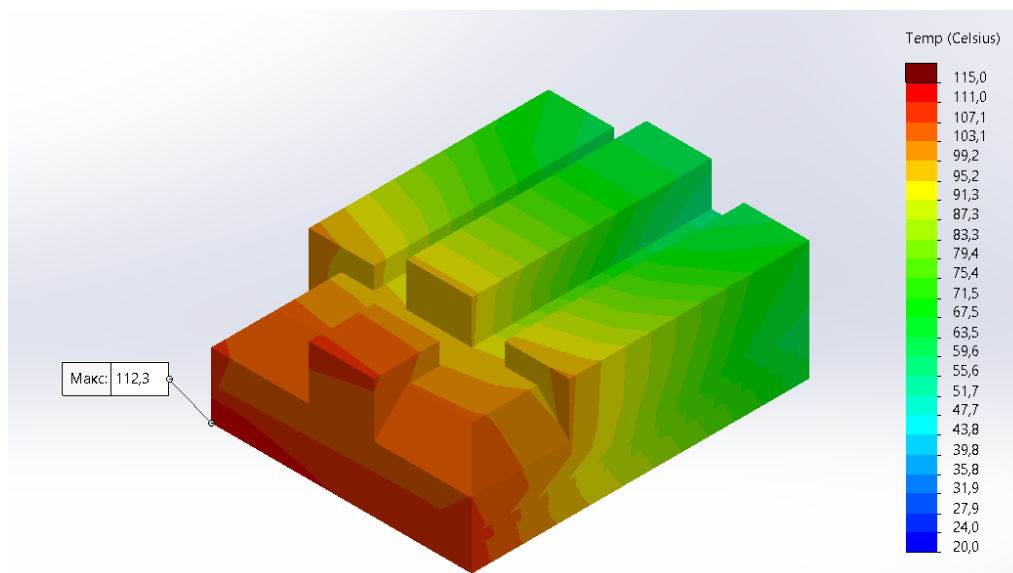


Рис. 8. Распределения температур при $\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и $W = 2\ 000 \text{ Вт/м}^2$

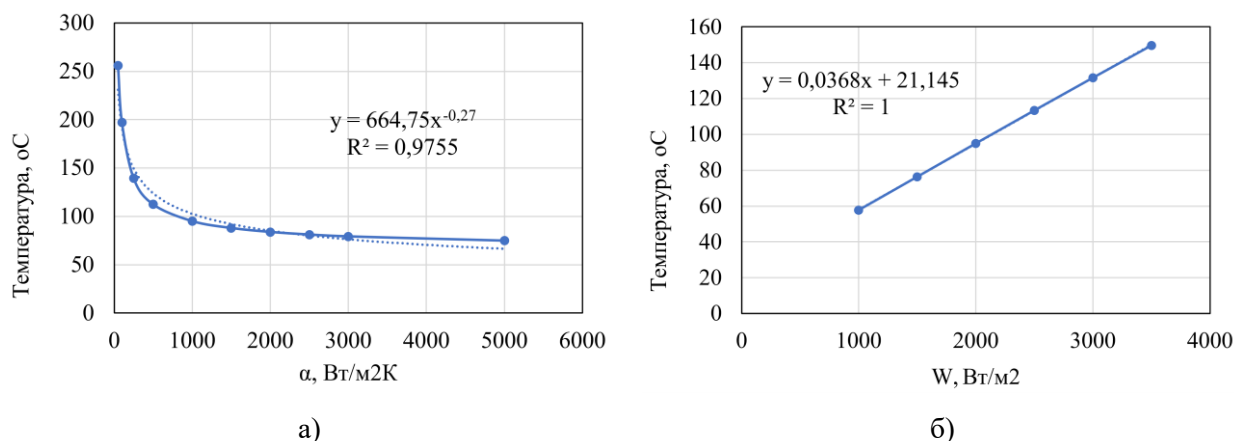


Рис. 9. Зависимость максимальной температуры магнитной системы от: (а) – коэффициента теплоотдачи жидкости, $T(\alpha)$, (б) – поглощаемой катодом мощности, $T(W)$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что зависимость температуры от коэффициента теплоотдачи имеет степенной характер и по этой причине его увеличение до значений свыше 3000...4000 Вт/м²К не приводит к значимому снижению температуры системы. Зависимость температуры от поглощаемой мощности в рассматриваемом диапазоне является линейной функцией и согласуется с имеющимися теоретическими представлениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная конструкция магнитной системы обеспечивает необходимые значения магнитной индукции в зоне образования плазмы в диапазоне 0,03...0,1 Тл. Конструкция охлаждающей системы способна обеспечивать допустимые рабочие температуры магнитной системы до 90 °С при поглощаемой катодом мощности до 2 500 Вт/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Кузьмичев, Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008. – 244 с. ISBN 966-8934-07-5
2. ELCUT : Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя / ООО «Тор». — [б. м.] : Издательские решения, 2023. – 290 с. ISBN 978-5-0060-6583-3
3. Справка по SOLIDWORKS. [Электронный ресурс]. Дата обращения: 03.05.2024 – https://help.solidworks.com/2023/Russian/SolidWorks/cworks/c_Thermal_Analysis.htm
4. Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев, Основы конструирования вакуумных систем. Под общ. ред. Р. А. Нилендера. М., «Энергия», 1971 – 392 с.
5. М. А. Михеев, И. М. Михеева, Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977 – 344 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Беликов Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0003-1036-9058). МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва, e-mail: belikov@bmstu.ru

Синявин Никита Михайлович – студент 4 курса бакалавриата (ORCID: 0009-0009-9837-2956). МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва, e-mail: nikitasinawin@ya.ru

Кипов Георгий Вячеславович – студент 1 курса магистратуры (ORCID: 0009-0001-1873-5318). МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва, e-mail: kipovgv@student.bmstu.ru